

論文の内容の要旨

論文題目	多点表面電気刺激と発現する手指姿勢の関係の表現方法
学 位 申 請 者	粕谷 美里

本論文は、機能的電気刺激(Functional electrical stimulation ; FES)を用いて手指姿勢を制御する技術の開発を目的としている。

FESは、電気刺激によって筋収縮を伴う関節運動を引き起こし、様々な姿勢を発現させる技術の総称であり、古くより幅広い分野でその有用性が述べられてきている。中でも、非侵襲なFESの刺激手法である表面電極法を多電極化した多点表面電気刺激により、複数の筋を同時に刺激することで引き起こされる関節運動によって、複雑な姿勢を発現させる機能の重要性が指摘されている。手指姿勢の制御には、前腕部の限られた領域に存在する数十本の筋を適切に選択し刺激する必要がある、姿勢の再現性を担保することには困難が伴う。この困難は、従来の研究により3つの課題として明らかにされている。

1. 電気刺激と発現姿勢の関係が明らかになっていないこと。

表面電気刺激の電流は皮膚や脂肪など様々な要素を介しており、その伝達経路を観測する手段が確立されてはいないことに起因している。

2. 電極の貼り替えによる発現姿勢の再現性の低下が大きいこと。

電極の貼り替えは、電極位置のずれや密着状態の変化、および、生体組織の経時変化などの影響を強く受ける。そのため、都度、刺激電極の探索が必要である。

3. 探索空間が膨大になること。

探索多点化による電極数の増加に伴い、電極群の組み合わせ問題の様相を呈し、探索候補が多くなる等、意図した姿勢を発現させる刺激電極の決定が困難になる。

いずれの課題も、刺激位置と発現姿勢の関係を表現する手法が確立されていないため、適切な皮膚表面上の刺激位置を容易に選択できないことに起因している。本論文ではこの課題を“皮膚表面上の刺激位置の選択問題”と表現した。従来研究では、これら課題が存在するために、制御可能な姿勢は握り開きなどの単純な姿勢に限定されてきた。また、意図する姿勢を制御する刺激電極位置の探索手法は、全走査探索や逐次的な試行錯誤的方法に留まっており、有用な刺激電極位置の探索手法が確立されていないため、姿勢の制御は介助者の技能に大きく依存してきた。そこで本論文では、刺激位置と発現姿勢の関係を表現する手法の開発に取り組み、次の方法論の提案を行い、

その性能の検証を行なった。本論文は全6章の構成になっている。

第1章は姿勢の発現に用いられる技術や背景について説明し、多点表面電気刺激を用いた発現姿勢の制御における課題について、先行研究を交えながら詳述している。その上で解決すべき問題を提示し、本研究の目的を述べている。

第2章では、刺激発生装置と、多電極選択装置を組み合わせた多点表面電気刺激システムの構成について述べている。

第3章は、刺激位置と発現姿勢の関係の表現方法について、その理論と手法を提案している。関係表現するために、刺激位置と発現姿勢を表現する空間の定義を行った。発現姿勢を、手指姿勢を手指の関節角度を要素とするベクトルで表現する“発現姿勢空間”と定義した。刺激位置は、個々の電極を自由に選択することで表現できる様々な刺激電極パターンを、刺激の極性を要素としてベクトルで表現する“刺激電極空間”と定義した。“刺激電極空間”は3種類用意し、25次元のベクトルで刺激電極パターンの刺激開始時の電極の極性で表記した“極性表記”、極性に関係なく刺激のON/OFFで表記した“ON/OFF表記”と、4次元のベクトルで刺激電極パターンの重心座標を表記した“座標表記”とした。“発現姿勢空間”には2種類用意し、手指姿勢を関節角度そのものを用いて11次元のベクトルで表記した“関節表記”と、計測した手指姿勢の関節角度を主成分分析し得られた主成分スコアを利用しベクトルで表記した“主成分スコア表記”とした。これらの空間を入出力とするニューラルネットワークを用いて関係の表現を試みた。関係の表現には、刺激電極パターンから手指姿勢を導出する“Forward model(F model)”と入出力関係を逆にした“Inverse model(I model)”を提案した。F modelは、手指姿勢に紐付いた刺激電極パターンを導出するLook up tableを構築することを目的としている。また、I modelはF modelによって導出された刺激電極パターンと手指姿勢を入出力として用いる。これにより、F modelよりもロバスト性の高い刺激電極パターンと姿勢の導出を目的としている。

第4章は、実験の構成と実験系について述べている。本実験では、直径32mmの円形ジェル状貼付電極を左前腕に5×5に配置し、合計25枚使用した。その中から、2×2の4枚を等電位とした4対4全刺激電極パターン走査刺激による125パターンの電気刺激を付与し、それによって発現する手指姿勢をCyber gloveで計測した。電気刺激は、1秒ごとにON、OFFを繰り返すものとし、被験者は立位姿勢において、付与される刺激電極パターンが不明の状態で、実験間の休憩を10分と設定し1日に5回全走査探索実験を行った。

第5章では、第3章で述べた刺激位置と発現姿勢の関係表現より得られた成果を示した。得られた成果は4種類である。1つ目に、関係表現に適した入出力表記が極性表記と関節表記であることを特定した。2つ目に、関係表現に適した表記を用いて構築したF modelによって導出したLook up tableにより、関係表現が姿勢に対し刺激電極パターンに競合のない2部グラフとして表記できることを示した。2つ目に、複数の使用者に対して全走査や逐次的な試行錯誤による刺激位置探索なしに、特定の手指姿勢を発現させることができるロバストな刺激電極パターンを5種類特定した。これにより、関係表現に基づく高効率な刺激位置探索手法が確立できた。3つ目に、ニューラルネットワークの重みから、手指関節に強い影響を及ぼす多点表面電極空間内の刺激電極を特定することに成功した。これにより、グー・チョキ・パーやサムズアップなどの、特徴的な形状の手指姿勢を発現させる刺激電極パターンを導出することができた。

第6章では、結論と今後の課題が述べられている。本論文により、刺激位置と発現姿勢の関係の表現方法の開発に成功した。これにより、手指姿勢の制御における課題を改善し、多点表面電気刺激による手指姿勢の制御が可能であると結論づけた。今後の展望では、開発した関係表現の性能を向上させより多くのユニバーサルな刺激電極パターンと手指姿勢の導出を目指すことと、麻痺者に対応した関係表現を開発していくことと述べた。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 粕谷 美里

審査委員主査 横井 浩史

委員 小池 卓二

委員 岡田 英孝

委員 狩野 豊

委員 杉 正夫

委員 姜 銀来

本論文では、機能的電気刺激(Functional electrical stimulation ; FES)を用いて手指姿勢を制御する技術の開発を目的とし、その研究成果が報告された。本論文は6章の構成になっていた。

第1章では、手指姿勢を制御する技術について背景と課題を示し述べられた。FESは、電気刺激によって筋収縮を伴う関節運動を引き起こし、様々な姿勢を発現させる技術の総称であり、古くより幅広い分野でその有用性が述べられてきている。中でも、非侵襲なFESの刺激手法である表面電極法を多電極化した多点表面電気刺激により引き起こされる関節運動によって、姿勢を発現させることを試みた関連研究を交えながら述べられ、その有用性と可能性が示された。そのうえで、本論文の課題が、皮膚表面上の刺激位置と発現する姿勢の関係表現がされておらず、目的に応じた適切な刺激位置を容易に選択できないことであるとし、この課題を“皮膚表面上の刺激位置の選択問題”と表現した。この課題によりこれまでの関連研究では発現する姿勢が握り開きなどの単純な姿勢に限定されてきたことや、意図する姿勢を発現させる刺激電極位置の探索手法が、全走査探索や逐次的な試行錯誤的方法に留まっており、有用な刺激電極位置の探索手法が確立されていないことが述べられた。これらの背景と課題から、刺激位置と発現姿勢の関係を表現する手法の開発に取り組むことを目的としたことが述べられた。

第2章では、手指姿勢を制御する多点表面電気刺激システムについて述べられた。本システムは、刺激発生装置“FES signals generator”と多点電極選択装置“FES Selector device”を組み合わせた構成になっている。“FES signals generator”は、高周波を低周波で変調した二相性のバースト変調矩形波を生成する装置である。この刺激波形は、痛みの少ない刺激を実現することを目的として、申請者の研究グループの先行研究で開発された。次に、“FES Selector device”は、刺激の出力を複数の任意の電極から出力させる装置である。本論文では選択した電極群を“刺激電極パターン”と表現した。

第3章は、刺激位置と発現姿勢の関係の表現方法について、その理論と手法が述

べられた。本論文ではニューラルネットワークを用いて関係を表現するために、“刺激電極空間”と“発現姿勢空間”が定義された。“刺激電極空間”には、刺激電極パターンを表す3種類の表記が用意された。“極性表記”と“ON/OFF表記”は、それぞれ25次元のベクトルで表し、刺激開始時の電極の極性の情報の有無が異なる。“座標表記”は4次元のベクトルで刺激電極パターンの重心座標を表した。“発現姿勢空間”には手指姿勢を表す2種類の表記が用意された。“関節表記”は11次元のベクトルで関節角度そのものを用いて表した。“主成分スコア表記”は関節角度を主成分分析し、累積寄与率が90%を超えた成分数をベクトルの次元数とした主成分スコアで表記した。関係の表現には、刺激電極パターンから手指姿勢を導出する“Forward model(F model)”と入出力関係を逆にした“Inverse model(I model)”が提案された。F modelは、手指姿勢に紐付いた刺激電極パターンを導出するLook up tableを構築することを目的としている。また、I modelはF modelによって導出された刺激電極パターンと手指姿勢を入出力として用いる。これにより、F modelよりもロバスト性の高い刺激電極パターンと姿勢の導出を目的としていると述べられた。

第4章は、実験の構成と実験系について述べられた。電極貼付方法は、左前腕に25枚の円形ジェル状貼付電極を5×5に配置された。刺激は、2×2の4枚を等電位とした4対4の125パターン全走査刺激を行い、それによって発現する手指姿勢をCyber gloveで計測した。実験プロトコルは、1秒ごとにON、OFFを繰り返すものとし、被験者は立位姿勢において、付与される刺激電極パターンが不明の状態で、1日に5回全走査刺激を行った。本実験のプロトコルは、刺激による運動パフォーマンスの経時的変化の予備実験の結果と、申請者らがこれまでに発表した国際学会論文などの知見も考慮して決定されていた。

第5章では、刺激位置と発現姿勢の関係表現より得られた成果が示された。得られた成果は4種類あった。1つは、関係表現に適した入出力表記が極性表記と関節表記であったこと。2つ目は、関係表現に適した表記を用いて構築したF modelによって導出したLook up tableにより、関係表現が姿勢に対し刺激電極パターンに競合のない2部グラフとして表記できること。3つ目は、複数の使用者に対して全走査や逐次的な試行錯誤による刺激位置探索なしに、特定の手指姿勢を発現させることができるロバストな刺激電極パターンを5種類特定したこと。これにより、関係表現に基づく高効率な刺激位置探索手法が確立できたこと。4つ目は、ニューラルネットワークの重みから、手指関節に強い影響を及ぼす多点表面電極空間内の刺激電極を特定することに成功したこと。これにより、グー・チョキ・パーやサムズアップなどの、特徴的な形状の手指姿勢を発現させる刺激電極パターンの導出に成功したことが示された。

第6章では、結論と今後の課題が述べられた。本論文の成果により、刺激位置と発現姿勢の関係の表現方法の開発に成功した。これにより、手指姿勢の制御における課題を改善し、多点表面電気刺激による手指姿勢の制御が可能であると結論づけられた。今後の展望では、開発した関係表現の性能を向上させより多くのユニバーサルな刺激電極パターンと手指姿勢の導出を目指すことと、麻痺者に対応した関係表現を開発していくことであると述べられた。

以上、本論文はその新規性、独創性および有用性が高く評価される。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。